

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Nemanja Musulin**

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

Mentor:

Dr. sc. Mislav Čehil

Student:

Nemanja Musulin

Zagreb, 2017.

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći se znanjima stečenim u svojem dosadašnjem školovanju te informacijama iz navedene literature.

Zahvaljujem se mentoru dr. sc. Mislavu Čehilu na pruženoj stručnoj pomoći te ustupljenom vremenu pri samoj izradi završnog rada.

Također, želim se zahvaliti svojim roditeljima na pruženoj podršci tijekom mojeg dosadašnjeg školovanja.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Nemanja Musulin**

Mat. br.: 0035189605

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Matematički model generatora pare**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Mathematical model of a steam generator**

Opis zadatka:

U radu je potrebno napraviti matematički model generatora pare napisan u Excel VBA. Generator pare sastoji se od dva ekonomajzera, isparivača i dva pregrijača unutar kojih se nalazi hladnjak pare.

Osnovni podaci generatora pare su:

- kapacitet: 100 t/h
- temperatura svježe pare: 510 °C
- tlak svježe pare: 80 bar

U rezultatima je potrebno prikazati ovisnost temperature vode/pare i dimnih plinova na granicama svih izmjenjivača, izmijenjen toplinski tok na izmjenjivačima, protok vode za hlađenje pare, iskoristivost generatora pare i potrošnju goriva o opterećenju generatora pare.

U radu treba navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć prilikom izrade rada.

Zadatak zadan:

30. studenog 2016.


Rok predaje rada:

- 1. rok: 24. veljače 2017.
- 2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2017.
- 3. rok: 22. rujna 2017.


Predviđeni datumi obrane:

- 1. rok: 27.2. - 03.03. 2017.
- 2. rok (izvanredni): 30. 06. 2017.
- 3. rok: 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

  
Doc. dr. sc. Mislav Čehil

Predsjednik Povjerenstva:

  
Prof. dr. sc. Igor Balen

## SADRŽAJ

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA .....	V
SAŽETAK.....	VI
1. UVOD .....	1
1.1 Generator pare .....	1
1.2 Gorivo.....	3
1.2.1 Kruta goriva .....	3
1.2.2 Tekuća goriva.....	4
1.2.3 Plinska goriva.....	4
1.3 Ložište .....	5
1.4 Ogrjevnne površine.....	6
1.4.1 Isparivač.....	6
1.4.2 Pregrijač .....	6
1.4.3 Međupregrijač .....	8
1.4.4 Ekonomajzer .....	9
1.4.4.1 Zagrijač napojne vode .....	10
1.4.4.2 Zagrijači zraka.....	11
2. VBA - VISUAL BASIC FOR APPLICATIONS .....	12
2.1 Općenito.....	12
3. OPIS KOTLOVSKOG POSTROJENJA .....	13
3.1 Tehničke karakteristike kotla.....	13
3.2 Opis kotlovskog postrojenja .....	14

4. MATEMATIČKI MODEL .....	18
4.1 Shema i opis modela.....	18
4.2 Dobiveni podaci u ovisnosti o opterećenju generatora pare .....	21
4.2.1 Maksimalna trajna proizvodnja pare od 100 t/h .....	21
4.2.2 Normalna proizvodnja pare od 80 t/h .....	22
4.2.3 Minimalna proizvodnja pare od 40 t/h.....	23
4.2.4 Preopterećenje kotla s proizvodnjom pare od 105 t/h.....	24
4.2.5 Proizvodnja pare 50, 60, 70 i 90 t/h .....	25
4.3 Usporedba rezultata u ovisnosti o opterećenju generatora pare .....	29
4.3.1 Količina vode za hlađenje pare u ovisnosti o opterećenju generatora pare .....	29
4.3.2 Potrošnja goriva u ovisnosti o opterećenju generatora pare .....	30
4.3.3 Ovisnost iskoristivosti generatora pare o opterećenju generatora pare .....	31
4.3.4 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka u ložištu u ovisnosti o opterećenju generatora pare.....	32
4.3.5 Temperature dimnih plinova po zonama generatora pare pri opterećenju od 100 t/h ..	33
5. ZAKLJUČAK .....	34
6. PRILOZI.....	35
7. LITERATURA.....	36

## POPIS SLIKA

Slika 1 Generator pare u INA Rafineriji nafte Sisak.....	1
Slika 2 Izobarna promjena stanja vode u generatoru pare .....	7
Slika 3 Proces međupregrijanja pare .....	8
Slika 4 Shema generatora pare .....	18
Slika 5 Ovisnost protoka vode za hlađenje pare i opterećenja generatora pare .....	29
Slika 6 Ovisnost potrošnje goriva o opterećenju generatora pare .....	30
Slika 7 Ovisnost iskoristivosti generatora pare o opterećenju generatora pare.....	31
Slika 8 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka u ložištu u ovisnosti o opterećenju generatora pare .....	32
Slika 9 Temperature dimnih plinova po zonama generatora pare pri opterećenju od 100 t/h .....	33

## POPIS TABLICA

Tablica 1 Klasifikacija ugljena.....	3
Tablica 2 Klasifikacija ložišta.....	5
Tablica 3 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 100 t/h..	21
Tablica 4 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 100 t/h .....	21
Tablica 5 Ostali rezultati za opterećenje 100 t/h .....	21
Tablica 6 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 80 t/h....	22
Tablica 7 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 80 t/h .....	22
Tablica 8 Ostali rezultati za opterećenje 80 t/h .....	22
Tablica 9 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 40 t/h....	23
Tablica 10 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 40 t/h .....	23
Tablica 11 Ostali rezultati za opterećenje 40 t/h .....	23
Tablica 12 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za preopterećenje od 105 t/h.....	24
Tablica 13 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za preopterećenje od 105 t/h.....	24
Tablica 14 Ostali rezultati za preopterećenje od 105 t/h.....	24
Tablica 15 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 50 t/h..	25
Tablica 16 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 50 t/h .....	25
Tablica 17 Ostali rezultati za opterećenje 50 t/h .....	25
Tablica 18 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 60 t/h..	26
Tablica 19 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 60 t/h .....	26
Tablica 20 Ostali rezultati za opterećenje 60 t/h .....	26
Tablica 21 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 70 t/h..	27
Tablica 22 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 70 t/h .....	27
Tablica 23 Ostali rezultati za opterećenje 70 t/h .....	27
Tablica 24 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 90 t/h..	28
Tablica 25 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 90 t/h .....	28
Tablica 26 Ostali rezultati za opterećenje 90 t/h .....	28



**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$Hd$	[kJ/kg]	ogrjevnost
$CH_4$	/	metan
$pH$	/	koncentracija vodikovih iona u nekoj otopini
$\varnothing$	[mm]	promjer cijevi
$s$	[mm]	debljina stijenke cijevi
$Q$	[kW]	izmijenjena toplina
$D$	[t/h]	protok vode/pare
$T_{wu}$	[°C]	temperatura vode/pare na ulazu
$T_{wi}$	[°C]	temperatura vode/pare na izlazu
$H_{wu}$	[kJ/kg]	entalpija vode/pare na ulazu
$H_{wi}$	[kJ/kg]	entalpija vode/pare na izlazu
$p_{wu}$	[bar]	tlak vode/pare na ulazu
$p_{wi}$	[bar]	tlak vode/pare na izlazu
$G$	[kg/s]	protok dimnih plinova po zonama
$T_{gu}$	[°C]	temperatura dimnih plinova na ulazu u zonu
$T_{gi}$	[°C]	temperatura dimnih plinova na izlazu iz zone

## SAŽETAK

Osnovna zadaća ovog rada bila je izrada modela generatora pare u računalnom programu Microsoft Excel Visual Basic for Applications.

Kao podloga za izradu rada poslužio je model „Matematički model – NPG Rafinerija Sisak“ dobiven na korištenje od strane mentora.

Nakon uvida i analize dostupne dokumentacije te uputa koje su kontinuirano dobivane od strane mentora, napravljena je shema generatora pare te se pristupilo određivanju izmjenjivačkih površina, zona dimnih plinova te općenito razumijevanju rada tog generatora pare.

Model je također prilagođen prema izlaznim podacima koji su dobiveni tijekom testiranja generatora pare da bi simulirani podaci što točnije opisivali rad generatora pare pri određenom opterećenju.

Zaključno je provedena usporedba rezultata na osnovi opterećenja generatora pare, tj. u ovisnosti o produkciji svježe pare, kada je utvrđeno da simulacija daje očekivane vrijednosti i opisuje realno ponašanje generatora pare.

# 1. UVOD

## 1.1 Generator pare

Generator pare ili parni kotao je kotao koji služi za proizvodnju vodene pare određenog tlaka i temperature koja služi kao radni fluid za pogon parnih turbina (za proizvodnju električne energije u termoelekttranama, za pogon velikih brodova, za pogon parnih lokomotiva i drugo) te za prijenos toplinske energije za razne pomoćne uređaje (za grijanje na primjer) [1].

Današnjim konstrukcijama primjereniji je naziv generatori pare, posebno ako para ima veći tlak od 22 bara, umjesto parni kotlovi [1].



Slika 1 Generator pare u INA Rafineriji nafte Sisak

Postoje mnoge podjele generatora pare, a neke od njih su:

- prema radnom tlaku
  - niskotlačni (do 7 bara)
  - srednjetlačni (do 22 bara)
  - visokotlačni (od 22 bara na više)
- prema vrsti pare koju proizvode
  - zasićenu paru
  - suhu paru
  - pregrijanu paru
- prema konstrukciji
  - vatrocijevni
  - vodocijevni
- prema gorivu
  - generatori pare na ugljen
  - generatori pare na tekuća goriva (nafta, lož ulje i sl.)
  - generatori pare na plinovita goriva

Ovdje su spomenute samo neke od raznih podjela za koje se danas smatra da su tehnički prihvatljive.

Glavni dijelovi generatora pare koji su bitni za obrađeno područje su:

- ložište
- ogrijevne površine: isparivač, pregrijač, međupregrijač, ekonomajzer (zagrijač vode i zagrijač zraka).

## 1.2 Gorivo

Goriva su primarni oblici energije u kojima je energija pohranjena u kemijskom ili nuklearnom obliku [3]. Oslobođanjem energije goriva povećava se unutarnja energija radne tvari koja se tada koristi za dobivanje rada ili toplinske energije [3]. U sadašnjem su trenutku tehnološkog razvoja najvažnija konvencionalna goriva fosilna: ugljen, nafta i zemni plin, te od nuklearnih goriva uran [3].

### 1.2.1 Kruta goriva

Najvažnije kruto gorivo je ugljen. Smatra se da je proces nastajanja ugljena započeo prije mnogo milijuna godina u močvarnim područjima kada je organska materija biljnog porijekla dospjela ispod površine vode [3]. U nedostatku zraka prvo se počinje stvarati treset. Povećanjem tlaka i temperature (tektonske promjene, vulkanska aktivnost) proces pougljivanja tokom vremena napreduje uz smanjenje udjela vlage i lakoishlapljivih sastojaka [3]. U zavisnosti od područja nastanka i geološke starosti ugljeni se mogu podijeliti u četiri osnovne grupe: ligniti, smeđi ugljeni, kameni ugljeni i antraciti [3].

Tablica 1 Klasifikacija ugljena

	Voda	Ogrjevnost $H_d$	Ishlapivi sastojci	Ukupni ugljik
	%	kJ/kg	%	%
Lignit	35-75	6700-19250	53-62	60-67
Smeđi ugljen	10-40	18850-26800	45-53	67-77
Kameniti ugljen	3-10	23900-35400	10-50	77-92
Antracit	<3	<35400	<10	>91

Osim ugljena koriste se još od krutih fosilnih goriva uljni škriljci čiji je glavni sastojak organska materija slična nafti [3]. Kao gorivo još se može koristiti otpadni materijal drvne industrije (piljevina, drveni otpaci) ili biomasa iz poljoprivrede [3].

### ***1.2.2 Tekuća goriva***

Osnova skoro svih tekućih goriva je sirova nafta [3]. Vjeruje se da je sirova nafta nastala raspadanjem organskih tvari prvenstveno životinjskog, ali i biljnog porijekla koje su se istaložile na dnu plićih dijelova bivših mora i oceana [3]. Sastoji se od različitih ugljikovodika s dodatkom nešto spojeva kisika, dušika i sumpora [3]. U zavisnosti od vrste ugljikovodikovih spojeva razlikuje se nafta metanske, naftenske i aromatske osnove te njihove mješavine [3]. Inicijalna rafinacija nafte provodi se frakcionom destilacijom pri čemu se na različitim temperaturama postepeno odvajaju prvo lakše pa zatim sve teže frakcije [3]. Proizvod koji preostaje nakon procesa destilacije naziva se mazut [3]. Mazut nastao destilacijom nafte s naftenskom osnovom služi u proizvodnji maziva, dok se ostali mazuti koriste uglavnom kao goriva u ložištima generatora pare [3]. Mazuti imaju visoku donju ogrjevnu vrijednost koja se kreće oko 40000 kJ/kg [3].

### ***1.2.3 Plinska goriva***

Zemni plin je najvažnije plinsko gorivo [3]. On je smjesa lakih ugljikovodika, vode i drugih plinova [3]. Sastav varira u zavisnosti od nalazišta u širokim granicama [3]. Najveći je postotak metana ( $\text{CH}_4$ ) koji iznosi 50-100 % [3]. Pored plinovitih ugljikovodika u sastavu se najčešće nalaze i ugljikovodici koji su pod okolišnim uvjetima u tekućem stanju [3]. Takvi sastojci se obično još u toku proizvodnje odvajaju kao plinski kondenzat [3]. Ogrjevna vrijednost zemnog plina iznosi u zavisnosti od sastava 33-38 MJ/m<sup>3</sup>[3]. U usporedbi s naftom korištenje zemnog plina je mlađeg datuma [3]. Zbog lakoće korištenja zemnog plina iz ležišta plina (direktno se iz bušotine vodi na mjesto upotrebe) njegova proizvodnja se stalno povećava [3]. Kasniji početak intenzivnijeg korištenje zemnog plina posljedica je problema koji su se pojavljivali s transportom i skladištenjem plina [3]. Danas su međutim tehnički problemi velikim dijelom riješeni. Izgrađeni su plinovodi koji spajaju zemlje i kontinente te omogućuju transport plina na velike udaljenosti [3]. S druge strane razvijena je tehnika ukapljivanja plina koja omogućuje morski transport velikih volumena [3].

### 1.3 Ložište

Ložište je prostor u kojemu se zbiva izgaranje (gorenje) ili pretvorba kemijske energije goriva u toplinsku energiju dimnih plinova [1]. Veličina i oblik ložišta ovise o učinku (kapacitetu) generatora pare, vrsti goriva i o načinu izgaranja[1]. Ložište je obloženo snopom isparivačkih cijevi na koje se prijelaz topline vrši uglavnom zračenjem [1].

Ložišta se mogu podijeliti po vrsti i načinu izgaranja goriva[3]. Samo kruto gorivo može izgarati u sloju: krutomili fluidiziranom [3]. Izgaranje se u krutom sloju odvija na rešetci koja se kreće kroz podnožje ložišta [3]. Kroz rešetku se upuhuje zrak potreban za izgaranje [3]. Čestice se u krutom sloju ne gibaju u odnosu na rešetku [3]. U fluidiziranom se sloju zrak upuhuje tolikom brzinom da podiže čestice goriva i kvarcnog pijeska (služi za popunjavanje prostora između čestica goriva zbog bolje fluidizacije) [3].

U prostoru mogu izgarati sve tri vrste goriva [3]. Tekuće se gorivo u gorionicima raspršuje u vrlo sitne kapljice čime mu se povećava površina i olakšava isparavanje, jer izgaraju pare tekućeg goriva [3]. Plinsko se gorivo u ložište ubacuje gorionicima u kojima se djelomično ili potpuno miješa sa zrakom zbog boljeg izgaranja [3].

Da bi izgarao u prostoru ugljen se mora mljevenjem usitniti u vrlo finu ugljenu prašinu koja se zajedno sa zrakom upuhuje u ložište [3]. Neizgoreni dio ugljene prašine pada u lijevak ložišta kroz koji se posebnim kanalom odvodi na deponij šljake i pepela [3].

Tablica 2 Klasifikacija ložišta

Ložišta			
Izgaranje u sloju		Izgaranje u prostoru	
U krutom sloju	U fluidiziranom sloju	Jednostrujnoili vrtložno	
		Plinska i tekuća goriva	Ugljenaprašina
			Kruti odvod troske      Tekući odvod troske

Ložišta moraju osigurati:

- što potpunije izgaranje s minimalnim koeficijentom pretička zraka
- što manje zašljakivanje ložišta i izmjenjivačkih površina
- odgovarajuću proizvodnju pare za unesenu količinu goriva
- veliku sigurnost u radu
- mogućnost lakog i jednostavnog opsluživanja
- mogućnost brzog reguliranja opterećenja u širokim granicama [3].

## **1.4 Ogrjevnne površine**

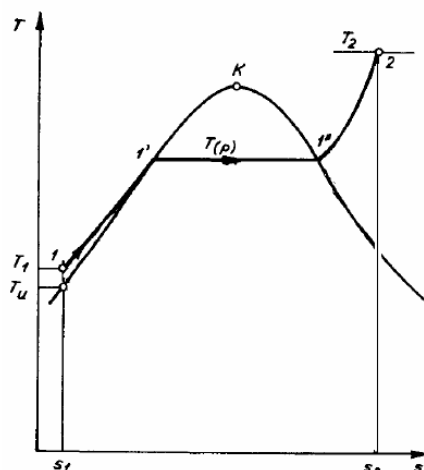
### ***1.4.1 Isparivač***

Isparivač ili točnije rečeno snop isparivačkih cijevi su ogrjevnne površine u kojima se vrši isparavanje vode. Prijelaz topline se vrši zračenjem i konvekcijom [1].

### ***1.4.2 Pregrijač***

Para se pregrijava prvenstveno zbog povećanja stupnja iskoristivosti kružnog procesa [3]. Na sl. 1 pregrijano je područje od stanja 1'' do 2 [3]. Povećanje pregrijanja za 55 °C povećava stupanj iskoristivosti za oko 1 % [3]. Pregrijana para ne sadrži kapljice vode zbog čega je manje erozivna i korozivna [3]. Pregrijanje pare je imperativ za parne turbine, a poželjno je i za parne strojeve [3]. Izlazna para iz turbine mora sadržavati manje od 15 % vlage da ne dođe do intenzivne erozije i korozije turbinskih lopatica [3].





Slika 2 Izobarna promjena stanja vode u generatoru pare

Toplina se dimnih plinova može predati pregrijačima: konvekcijom, zračenjem ili kombiniranim djelovanjem jednog i drugog [3]. Postizanje se najviših temperatura pregrijanja može osigurati samo kombiniranim djelovanjem [3].

Konvektivni se pregrijači postavljaju u struju dimnih plinova tako da su cijevnomzavjesom ili paketima cijevi zaklonjeni od direktnog zračenja plamena iz ložišta [3]. Obično se izvode u dva stupnja (dva paketa) s ubrizgavanjem napojne vode u struju pregrijane pare između njih, radi regulacije temperature izlazne pare [3]. Prijelaz topline se kao kod svih konvektivnih površina poboljšava s povećanjem opterećenja [3].

Ozračeni se pregrijači koriste u generatorima pare s najvišim parametrima, jer drukčije nije moguće ostvariti pregrijanja pare od  $> 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  [3]. Smještaju se na prednjem ekranu, bočnim ekranima, stropu ili u prestrujnom kanalu, tako da ipak nisu na direktnom udaru plamena, zbog slabije sposobnosti hlađenja cijevi od strane pregrijane pare [3]. Osjetljivi su na stvaranje sloja na unutarnjoj strani cijevi zbog čega zahtijevaju visoke standarde pripreme napojne vode [3].

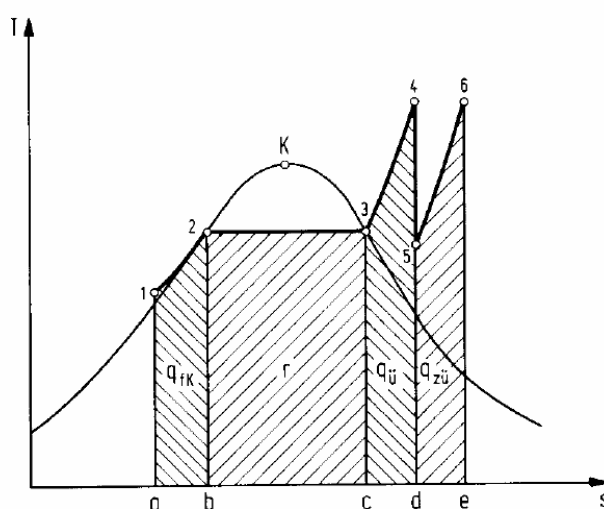
Dobre karakteristike ozračenih pregrijača su:

- dodatno hlađenje ložišta (zbog visokih tlakova toplina se isparavanja vodesmanjuje, a time i odvođenje topline u ložištu)
- u kombinaciji s konvektivnim pregrijačima daju temperaturnu karakteristiku slaboovisnu o opterećenju
- jednostavne su konstrukcije [3].

### 1.4.3 Međupregrijač

Površina u kojoj se vrši pregrijavanje vodene pare na potrebnu radnu temperaturu i tlak. To su toplinski najopterećeniji dijelovi generatora pare [1]. Prijelaz topline se vrši konvekcijom i zračenjem dimnih plinova [1].

Proces međupregrijavanja pare prikazan je na sl. 2 [3]. Svježa se para ekspandira u visokotlačnom dijelu turbine do tlaka međupregrijanja, vraća se u generator pare u kojemu se međupregrijava obično do iste temperature kao i svježa para (od stanja 5 do stanja 6), te ponovo ekspandira u niskotlačnom dijelu turbine [3].



Slika 3 Proces međupregrijanja pare

Sadašnji trendovi u projektiranju međupregrijača:

- jedno međupregrijanje za podkritične tlakove
- dva međupregrijanja za nadkritične tlakove
- bolje je uvesti međupregrijanje nego imati previsoku temperaturu svježe pare
- uvođenje međupregrijanja poskupljuje turbinu (kompliciranija izvedba kućišta tedulji parovodi i složenija regulacijska oprema), ali ne poskupljuje bitno generator pare
- iznad 400 °C spašava se 4,5-5 % topline, ali se gubi po 1 % za svakih 10 % povećanja ukupnog pada tlaka [3].

Prednosti međupregrijanja pare:

- povećava se stupanj iskoristivosti procesa
- smanjuje se vlažnost u zadnjim stupnjevima turbine do 50 %
- smanjuje se snaga napojne pumpe za 15-18 %
- smanjuju se dimenzije kondenzatora za 7-8 %
- smanjuju se gorionici za oko 5 %
- smanjuje se generator pare za 15-18 %
- smanjuju se dimenzije predgrijača napojne vode [3].
- 

Nedostaci međupregrijanja pare:

- povećava se cijena turbine kao i ukupni investicijski trošak
- zbog dodatnih cjevovoda i ventila otežano rukovanje i kontrola [3].

#### ***1.4.4 Ekonomajzer***

Ekonomajzerske površine čine zagrijači napojne vode i zagrijači zraka [3]. Ugrađuju se u izlaznom dijelu generatora pare čime snižuju izlaznu temperaturu dimnih plinova [3]. Time se ostvaruje poboljšavanje stupnja iskoristivosti generatora pare (odatle naziv ekonomajzerske površine) [3]. Smanjenjem izlazne temperature dimnih plinova za 15-20 °C, ostvaruje se poboljšanje stupnja iskoristivosti generatora pare za oko 1 % [3]. Kod današnjih generatora pare izlazne temperature obično iznose na punom opterećenju 130-150 °C [3]. Ukupno se na ovaj način stupanj iskoristivosti generatora pare može povećati za oko 3-5 % te iznosi 92-94 % [3].

Utjecajni faktori o kojima ovise izlazne temperature dimnih plinova:

- količina topline koja se može izmijeniti u generatoru pare
- ulazna temperatura napojne vode i zraka
- rosište dimnih plinova
- cijena uređaja [3].

Problemi koji se javljaju u vezi s ekonomajzerskim površinama:

- projektiranje niskog opterećenja (da bi se smanjila niskotemperaturna korozija)  
potrebni su bypass na dimnim plinovima i recirkulacija na dovodu vode i zraka
- povećano onečišćenje
- potrebni su ventilatori

- potrebni su povećana pažnja i skuplje održavanje [3].

Postoji uvijek optimalna temperatura dimnih plinova na izlazu iz generatora pare kada su troškovi proizvodnje pare minimalni [3]. Međutim, postoje i situacije kada se ekonomajzerske površine ne upotrebljavaju (taj se prostor smanjuje kako se cijene goriva podižu):

- kada je gorivo jeftino
- kada se generator pare loži sezonski
- kada generator pare služi kao pomoćni uređaj za proizvodnju pare [3].

#### 1.4.4.1 Zagrijač napojne vode

Obično su smješteni između međupregrijača pare i zagrijača zraka [3]. Ukoliko nema zagrijača zraka, tada su zagrijači vode zadnje izmjenjivačke površine generatora pare [3]. U pravilu se voda u njima zagrijava ispod temperature zasićenja, kako se ne bi pojavila para koja može izazvati kavitaciju i oštećenja [3]. Ako su ipak predviđeni za zagrijavanje vode s ulaskom u zasićeno područje, tada su posebne konstrukcije i nazivaju se predisparivači [3].

Prednosti zagrijača vode:

- koriste se i za male jedinice i niže tlakove
- potrošnja je dodatne snage mala
- brže puštanje u pogon generatora pare
- zauzima relativno mali prostor
- smanjuje opterećenje ogrjevnih površina [3].

Po konstrukciji mogu biti:

- integralni dio isparivačkog kruga
  - odvojeni paketi - obično su smješteni u konvektivnom kanalu generatora pare, izlazni im je kolektor spojen s bubnjem [3].

Po tehnološkom postupku izrade dijele se na:

- čelične sa ili bez rebara - osjetljivi na kisik u vodi i  $pH$  vrijednost vode, u pravilu se koriste veće brzine strujanja vode

- lijevani - za niže tlakove, otporniji na kvalitetu vode i niskotemperaturnu koroziju, skuplji u izradi [3].

#### 1.4.4.2 Zagrijači zraka

Isplativi su u pravilu za generatore pare kapaciteta iznad 20-25 t/h [3]. Smješteni su obično iza zagrijača vode, na kraju generatora pare [3].. Zagrijavanje zraka za 55 °C povećava stupanj iskoristivosti generatora pare za oko 2 % [3]. Jednostavnije su i lakše konstrukcije od zagrijača vode zbog nižih tlakova [3].. Zbog slabijeg koeficijenta prolaza topline zahtijevaju velike površine [3]. Zrak se zagrijava zbog:

- povećanja stupnja iskoristivosti generatora pare
- sušenja goriva
- boljeg izgaranja - uslijed viših temperatura [3].

Zagrijači se zraka mogu podijeliti na:

- rekuperatore - zrak su i dimni plinovi odvojeni stijenkom
  - cijevni
  - pločasti
- regeneratore - rotacioni (Ljungstrom), 70 % svih zagrijača zraka su ovoga tipa, grijani se elementi sastoje od tankih čeličnih limova (saće) koji se naizmjenično zagrijavaju dimnim plinovima i hlade zrakom, vrlo su efikasni ali se javlja problem brtvljenja [3].

## **2. VBA - VISUAL BASIC FOR APPLICATIONS**

### **2.1 Općenito**

Visual Basic je programski jezik koji se temelji na najpopularnijem programskom jeziku BASICu, ali ga svojim poboljšanim i proširenim mogućnostima te novom koncepcijom s grafičkim sučeljem daleko nadilazi [4].

Excel sadrži posebnu verziju Visual Basicu koju je Microsoft nazvao Visual Basic for Applications – VBA [4].

VBA u Excelu je složeni programski kod koji se može snimiti pomoću makro aplikacije u Excelu ili napisati ručno u VB Editoru [5]. VBA makro kod sastoji se od procedura kao cjelina, a koje se opet sastoje od niza naredbenih linija koje odrađuju neku naredbu ili radnju [5]. VBA makro kodovi pohranjeni su u Excel radnoj knjizi/bilježnici koja može sadržavati više modula. VBA makro kodove se mogu pisati u modulima ili direktno u radnom listu [5].

VBA programski kod je smješten u samom dokumentu i to u kodnim modulima, modulima klasa i korisničkim formama. Unutar kodnog modula se nalaze procedure, dok modul klasa sadrži definicije korisnički definiranih klasa. Korisnička forma predstavlja prozor na kojem se nalaze razne korisničke kontrole (gumbi, meniji, liste itd.) [5].

VBA programski kod se unosi u formi procedure [5]. Procedure dijelimo na subprocedure i funkcije [5]. Subprocedure predstavljaju skup VBA naredbi kojima se izvršava određeni zadatak i one ne vraćaju nikakav rezultat [5]. S druge strane funkcija također izvršava određeni zadatak, ali pritom vraća rezultat [5]. Pored ove dvije vrste, postoje još i procedure svojstva koje služe da definiraju ili vrate svojstvo za određeni objekt [5]. Svojstvo može biti visina, širina, boja itd. [5].

### 3. OPIS KOTLOVSKOG POSTROJENJA

#### 3.1 Tehničke karakteristike kotla

Vrsta: Strmocijevni radijacioni parni kotao, s prirodnom cirkulacijom kotlovske vode, s jednim bubnjem, izrađen u samostojećoj konstrukciji [6].

Proizvod: Waagner Biro – Graz, broj 2864

Tip: 70/100-1 Ta 95

Godina gradnje: 1978.

Učin:

- normalna proizvodnja pare	80 t/h
- maksimalna trajna proizvodnja pare	100 t/h
- minimalna proizvodnja pare	40 t/h
- tlak na izlazu iz pregrijača pare	80 bar
- temperatura pregrijane pare	510 ° C
- temperatura napojne vode	140 ° C
- pretičak zraka	1,05
- preopterećenje kotla (dnevno 3x po 1 h)	105 t/h

Stupanj djelovanja:

za loženje teškim lož uljem

- kod 80% učina	92,7%
- kod 100% učina	92,5%

Ogrjevná površina kotla:

- isparna površina kotla	749 m <sup>2</sup>
- pregrijač pare	619 m <sup>2</sup>
- zagrijač vode	1625 m <sup>2</sup> [6]

### 3.2 Opis kotlovskog postrojenja

Strmocijevni radijacioni parni kotao izveden je u samonosivoj konstrukciji s membranskim cijevnim stijenama [6]. Ložište kotla i drugi prolaz dimnih plinova obloženi su membranskim cijevima, koje su tako oblikovane i postavljene da omogućavaju smještaj ogrjevnih površina, vođenje dimnih plinova i nosivost tereta kotlovskih ogrjevnih površina [6].

Isparnu ogrjevnu površinu kotla čine ogrjevne površine membranskih cijevnih stijena ložišta kotla i drugog prolaza dimnih plinova kotla [7].

Ogrjevnu površinu pregrijača pare čine ogrjevne površine: cijevi zavješnja pregrijača pare, pregrijač pare I izveden kao konvektivni ležeći cijevni snop i pregrijača II izveden kao ležeći škotski cijevni snop [7]. Oba pregrijača pare ugrađena su u drugom prolazu dimnih plinova kotla [7].

Ogrjevne površine zagrijača vode čine četiri konvektivna snopa podijeljena u dvije grupe, od kojih je zagrijač vode I ugrađen u trećem prolazu dimnih plinova smješten izvan kotlovnice i zagrijač II ugrađen u donjem dijelu drugog prolaza dimnih plinova [7].

Dimni plinovi nastali izgaranjem goriva u kotlu predaju svoju toplinu vodi i pari u kotlu; dimnim prolazima vode se kroz kota, a onda limenim dimnim kanalima do dimnjaka i kroz dimnjak u atmosferu [7].

Kotlovsko postrojenje u skladu s važećim propisima, opremljeno je armaturom i pomoćnim uređajima koji obuhvaćaju sljedeću opremu:

#### Bubanj kotla

Bubanj kotla promjera 1400 mm i cilindrične dužine 5150 mm, izveden iz kotlovskog lima, debljine 45 mm iz kvalitete materijala ATHERM NiMoV, u zavarenoj izvedbi, s obje strane opremljen bombiranim dancima s ulaznim otvorima [7].

Bubanj je opremljen nastavcima za priključenje spojnih padnih i prestrujnih cijevi kotla, spojnih cijevi pregrijača pare, ugradnju fine armature te unutarnjim ugradnjama za: dovod napojne vode i odvodnjavanje i odsoljavanje kotla [7].



### Isparni sustav kotla

Isparni sustav kotla obuhvaća:

- isparni sustav ložišta kotla,
- isparni sustav drugog prolaza kotla i
- predisparivač – zagrijač vode [7].

### Isparni sustav ložišta kotla

Isparni sustav ložišta kotla čine membranske cijevne stijene koje oblikuju kotlovsko ložište izvedene iz cijevi  $\varnothing 70 \times 5,6$  mm, zavarene međusobno perajima iz profilnog čelika [7].

Membranske cijevne stijene: prednja i stropna, dvije bočne te stražnja i podna na svojim donjim i gornjim krajevima završavaju u sabirnim komorama iz cijevi  $\varnothing 219,1 \times 30$  mm [7]. Na sabirnim komorama izvedeni su nastavci za priključenje spojnih padnih i prestrujnih cijevi [7].

### Isparni sustav drugog prolaza kotla

Isparni sustav drugog prolaza kotla čine membranske cijevi  $\varnothing 70 \times 4,0$  mm međusobno zavarene perajima iz profilnog čelika [7]. Membranske cijevne stijene drugog prolaza kotla čine dvije bočne stijene i stražnja stijena koja u donjem dijelu prelazi u podnu stijednu [7]. Membranske cijevne stijene svojim gornjim i donjim krajevima završavaju sabirnim komorama iz cijevi  $\varnothing 219,1 \times 30$  mm [7]. Na sabirnim komorama izvedeni su nastavci za priključenje padnih ili prestrujnih spojnih cijevi [7].

### Predisparivač – zagrijač vode

Predisparivač – zagrijač vode sastoji se iz četiri ležeća snopa cijevnih vijuga [7].

Predisparivač I čine tri ležeća snopa cijevnih vijuga iz cijevi  $\varnothing 25 \times 3,2$  mm koje se pružaju između gornje i donje sabirne komore iz cijevi  $\varnothing 168,3 \times 12$  mm [7]. Predisparivač I je ugrađen u trećem prolazu kotla smješten izvan kotlovnice [7].

Predisparivač II čini ležeći snop cijevnih vijuga ugrađen u donjem dijelu drugog prolaza kotla, izveden iz cijev  $\varnothing 31,8 \times 3,2$  mm, koje se pružaju između donje i gornje sabirne komore iz cijevi  $\varnothing 168,3 \times 12$  mm [7].

Predisparivači su spojnim cijevima, preko sabirnih komora vezani na napojni sustav, međusobno, te na napojni priključak bubnja kotla.

### Pregrijač pare

Pregrijač pare je smješten u drugom prolazu dimnih plinova izveden iz dva ležeća cijevna snopa, sastoji se iz: cijevi zavješnja pregrijača, pregrijača I, hladnjaka pare i pregrijača II [7].

Cijevi zavješnja pregrijača pružaju se između dvije sabirne međukomore [7]. Noseće cijevi zavješnja pregrijača pare i predisparivača II pružaju se u dvije vertikale tako da putem navarenih držača iz vatrootpornog materijala svaku cijev pregrijača i predisparivača II nose u dvije točke [7].

Gornja sabirna međukomora spojnim cijevima vezana je na bubanj kotla, a donja sabirna međukomora na gornju sabirnu komoru pregrijača I.

Noseće cijevi zavješnja izvedene su iz cijevi  $\varnothing 25$  i debljine stijenke  $s = 12$  mm [7].

### Pregrijač pare I

Pregrijač pare I izveden je kao dvostepeni ležeći konvektivni cijevni snop iz 2 x 36 komada cijevnih vijuga iz cijevi  $\varnothing 31,8 \times 4,0$  mm [7].

Cijevne vijuge se pružaju između sabirnih komora pregrijača iz cijevi  $\varnothing 168,3 \times 16$  mm [7].

### Pregrijač pare II

Pregrijač pare II izveden je kao ležeći ozračeni škotski pregrijač pare iz 36 komada cijevnih vijuga iz cijevi  $\varnothing 31,8 \times 4,5$  mm, a pružaju se između donje i gornje sabirne komore pregrijača iz cijevi  $\varnothing 168,3 \times 20$  mm [7].

Hladnjak pare

Između pregrijača pare I i pregrijača pare II ugrađen je ležeći hladnjak pare za održavanje konstantne temperature pare na izlazu iz pregrijača pare [7].

Para iz izlazne komore pregrijača I spojnim cijevima se vodi do hladnjaka pare, ohlađena para iz hladnjaka spojnim cijevima vodi se do ulazne komore pregrijača pare II.

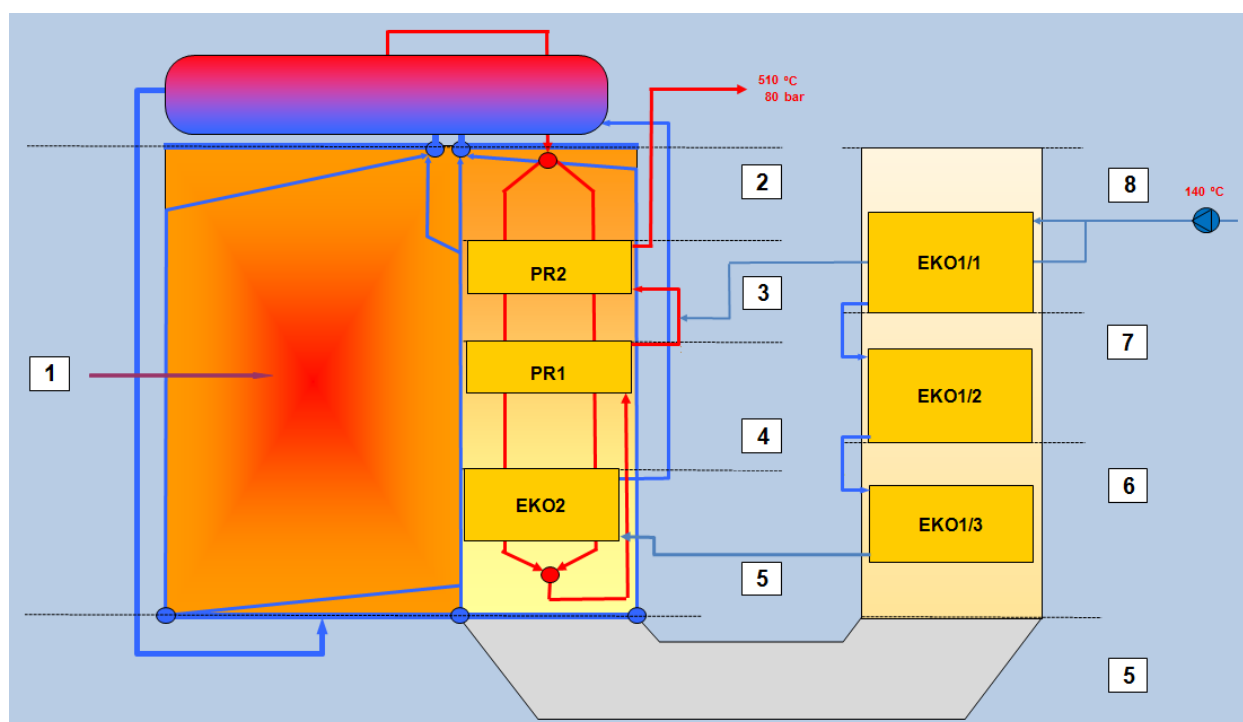
Hladnjak pare izveden iz cijevi dimenzija  $\varnothing 219,1 \times 30$  mm [7].

## 4. MATEMATIČKI MODEL

### 4.1 Shema i opis modela

Osnova za ovaj model je bio „Matematički model – NPG Rafinerija Sisak“ dobiven na korištenje od strane mentora.

Pregledom i proučavanjem dostupnih dokumenata i opisa postrojenja iz: Institut za elektroprivredu – Zagreb: GARANCIJSKA ISPITIVANJA KOTLOVA WAAGNER BIRO, TIP 70/100-1 TA 95 U ENERGANI KPVI INA- RAFINERIJA SISAK, Zagreb, 1981. te INA – RAFINERIJA SISAK: GLAVNI STROJARSKO TEHNOLOŠKI PROJEKT INDUSTRIJSKE TE-KP 6, Zagreb, svibanj 1977. izrađen je pojednostavljeni model generatora pare.



Slika 4 Shema generatora pare

Na shemi vidimo generator pare, podjelu unutar istog na zone dimnih plinova te na dijelove koji vrše izmjenu topline na relaciji voda/para – dimni plinovi.

### Zone dimnih plinova:

1. Ložište (LOŽ)
2. Prijelazna zona (PZ)
3. Pregrijač II (Pr2)
4. Pregrijač I (Pr1)
5. Ekonomajzer II (EKO2)
6. Ekonomajzer I-3 (EKO13)
7. Ekonomajzer I-2 (EKO12)
8. Ekonomajzer I-1 (EKO11)

### Izmjenjivači topline

1. Ekonomajzer I-1 (EKO11)
2. Ekonomajzer I-2 (EKO12)
3. Ekonomajzer I-3 (EKO13)
4. Ekonomajzer II (EKO2)
5. Isparivač - Ložište (LOŽ)
6. Isparivač - Drugi prolaz dimnih plinova (2pr)
7. Isparivač – Prijelazna zona (PZ)
8. Noseće cijevi (NC)
9. Pregrijač I (Pr1)
10. Pregrijač II (Pr2)

### Kao parametri koji se reguliraju su postavljeni:

- temperatura pregrijane pare
- proizvodnja pare
- tlak na izlazu iz pregrijača pare
- temperatura napojne vode
- pretičak zraka
- temperatura i gustoća zraka
- protok za odmuljivanje
- debljina čađe na ekonomajzerima i pregrijačima
- sastav goriva (lož ulje)

- stupanj djelovanja zračenja na okolinu
- korekcijski faktori za izmijenjenu toplinu po pojedinom izmjenjivaču

Paramteri koje dobijemo na osnovi modela i simulacije u ovisnosti o opterećenju generatora pare:

- temperature, entalpije i tlakove vode/pare na svim ulazima i izlazima izmjenjivačkih površina
- protok vode/pare
- temperature dimnih plinova po zonama
- količinu dimnih plinova
- izmijenjene toplinske tokove na izmjenjivačima
- količinu vode za hlađenje pare
- iskoristivost generatora pare
- potrošnju goriva

Program je napravljen tako da interativnim postupkom dolazi do rješenja.

Obuhvaćene su masene i energetske bilance, a voda/para i dimni plinovi podijeljeni na kontrolne volumene po sustavu koji su vidljivi na shemi generatora pare.

## 4.2 Dobiveni podaci u ovisnosti o opterećenju generatora pare

Najprije gledamo rezultate za četiri opterećenja koja su najvažnija iz razloga jer su ona navedena kao maksimalna trajna, normalna i minimalna proizvodnja generatora pare te kao proizvodnja pare pri kojoj se vrši preopterećenje kotla.

### 4.2.1 Maksimalna trajna proizvodnja pare od 100 t/h

Tablica 3 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 100 t/h

Površina na strani vode-pare								
	Q	D	$T_{wu}$	$T_{wi}$	$H_{wu}$	$H_{wi}$	$P_{wu}$	$P_{wi}$
	kW	t/h	°C	°C	kJ/kg	kJ/kg	bar	bar
EKO1/1	2026,23	95,83	140,00	157,60	595,69	671,81	107,68	105,05
EKO1/2	2172,76	95,83	157,60	176,37	671,81	753,43	105,05	101,98
EKO1/3	4900,42	95,83	176,37	217,97	753,43	937,52	101,98	97,58
EKO2	5490,95	95,83	217,97	261,56	937,52	1143,80	97,58	92,03
ISP - lož	33355,66	835,47	302,16	304,86	1358,13	1501,85	92,03	92,03
SP - drugi prolaz DF	6945,83	556,98	302,16	304,86	1358,13	1403,02	92,03	92,03
PZ - prijelazna zona	1067,26	556,98	304,86	304,86	1403,02	1409,92	92,03	92,03
NC	1086,78	92,83	304,86	311,86	2741,18	2783,32	92,03	91,50
PR1	11212,54	92,83	311,86	432,56	2783,32	3218,15	91,50	86,53
PR2	10914,91	100,00	367,80	510,00	3030,12	3423,06	86,53	80,00

Tablica 4 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 100 t/h

Površina na strani DP			
	G	$T_{gu}$	$T_{gi}$
	kg/s	°C	°C
LOŽ	30,38	2232,21	1410,24
PZ - prijelazna zona	30,58	1410,24	1352,02
PR2	30,78	1352,02	1019,24
PR1	30,98	1019,24	666,10
EKO2	31,18	666,10	455,31
EKO1/3	31,38	455,31	312,31
EKO1/2	31,58	312,31	246,63
EKO1/1	31,58	246,63	185,95

Tablica 5 Ostali rezultati za opterećenje 100 t/h

Ostali rezultati		
Količina vode za hlađenje	7,169854	t/h
Iskoristivost generatora pare	0,921282	
Potrošnja goriva	7006,355	kg/h
Unosena toplota u ložište	84742,47	kW

#### 4.2.2 Normalna proizvodnja pare od 80 t/h

Tablica 6 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 80 t/h

Površina na strani vode-pare								
	Q	D	T <sub>wu</sub>	T <sub>wi</sub>	H <sub>wu</sub>	H <sub>wi</sub>	P <sub>wu</sub>	P <sub>wi</sub>
	kW	t/h	°C	°C	kJ/kg	kJ/kg	bar	bar
EKO1/1	1342,38	78,79	140,00	154,20	595,69	657,02	108,85	105,46
EKO1/2	1535,41	78,79	154,20	170,35	657,02	727,17	105,46	101,43
EKO1/3	3525,49	78,79	170,35	207,09	727,17	888,25	101,43	96,14
EKO2	4117,39	78,79	207,09	247,84	888,25	1076,37	96,14	89,11
ISP - lož	29289,21	682,15	299,13	302,57	1341,10	1495,67	89,11	89,11
SP - drugi prolaz DF	5225,09	454,77	299,13	302,57	1341,10	1382,46	89,11	89,11
PZ - prijelazna zona	857,92	454,77	302,57	302,57	1382,46	1389,25	89,11	89,11
NC	696,14	75,79	302,57	308,26	2745,96	2779,03	89,11	88,71
PR1	8432,44	75,79	308,26	417,25	2779,03	3179,55	88,71	84,83
PR2	8430,10	80,00	370,67	510,00	3043,70	3423,06	84,83	80,00

Tablica 7 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 80 t/h

Površina na strani DP			
	G	T <sub>gu</sub>	T <sub>gi</sub>
	kg/s	°C	°C
LOŽ	24,23	2232,21	1325,10
PZ - prijelazna zona	24,39	1325,10	1271,23
PR2	24,54	1271,23	948,35
PR1	24,70	948,35	612,99
EKO2	24,86	612,99	413,44
EKO1/3	25,02	413,44	283,03
EKO1/2	25,18	283,03	224,50
EKO1/1	25,18	224,50	173,71

Tablica 8 Ostali rezultati za opterećenje 80 t/h

Ostali rezultati		
Količina vode za hlađenje	4,205825	t/h
Iskoristivost generatora pare	0,925901	
Potrošnja goriva	5587,45	kg/h
Unosena toplota u ložište	67580,69	kW



#### 4.2.3 Minimalna proizvodnja pare od 40 t/h

Tablica 9 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 40 t/h

Površina na strani vode-pare								
	Q	D	$T_{wu}$	$T_{wi}$	$H_{wu}$	$H_{wi}$	$P_{wu}$	$P_{wi}$
	kW	t/h	°C	°C	kJ/kg	kJ/kg	bar	bar
EKO1/1	324,37	43,00	140,00	146,45	595,69	622,85	94,14	92,17
EKO1/2	470,65	43,00	146,45	155,62	622,85	662,25	92,17	89,83
EKO1/3	1208,63	43,00	155,62	178,84	662,25	763,44	89,83	86,93
EKO2	1615,77	43,00	178,84	209,51	763,44	898,71	86,93	83,02
ISP - lož	18590,23	360,00	291,84	297,49	1301,38	1487,28	83,02	83,02
SP - drugi prolaz DF	1974,60	240,00	291,84	297,26	1301,38	1331,00	83,02	83,02
PZ - prijelazna zona	399,27	240,00	297,26	297,49	1331,00	1336,99	83,02	83,02
NC	84,99	40,00	297,49	298,76	2755,28	2762,93	83,02	82,88
PR1	3142,64	40,00	298,76	368,59	2762,93	3045,77	82,88	81,50
PR2	3393,32	40,00	368,59	480,68	3045,77	3351,17	81,50	80,00

Tablica 10 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 40 t/h

Površina na strani DP			
	G	$T_{gu}$	$T_{gi}$
	kg/s	°C	°C
LOŽ	11,82	2232,21	1041,52
PZ - prijelazna zona	11,90	1041,52	1001,63
PR2	11,97	1001,63	731,24
PR1	12,05	731,24	468,21
EKO2	12,13	468,21	307,77
EKO1/3	12,21	307,77	213,78
EKO1/2	12,29	213,78	176,22
EKO1/1	12,29	176,22	150,73

Tablica 11 Ostali rezultati za opterećenje 40 t/h

Ostali rezultati		
Količina vode za hlađenje	0	t/h
Iskoristivost generatora pare	0,933445	
Potrošnja goriva	2725,916	kg/h
Unosena toplota u ložište	32970,18	kW

#### 4.2.4 Preopterećenje kotla s proizvodnjom pare od 105 t/h

Tablica 12 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za preopterećenje od 105 t/h

Površina na strani vode-pare								
	Q	D	$T_{wu}$	$T_{wi}$	$H_{wu}$	$H_{wi}$	$P_{wu}$	$P_{wi}$
	kW	t/h	°C	°C	kJ/kg	kJ/kg	bar	bar
EKO1/1	2211,77	100,09	140,00	158,41	595,69	675,25	106,01	103,80
EKO1/2	2338,44	100,09	158,41	177,74	675,25	759,36	103,80	101,25
EKO1/3	5260,79	100,09	177,74	220,42	759,36	948,58	101,25	97,39
EKO2	5846,84	100,09	220,42	264,61	948,58	1158,88	97,39	92,70
ISP - lož	34292,25	873,78	302,83	305,38	1361,95	1503,24	92,70	92,70
SP - drugi prolaz DF	7382,57	582,52	302,83	305,38	1361,95	1407,58	92,70	92,70
PZ - prijelazna zona	1136,06	582,52	305,38	305,38	1407,58	1414,60	92,70	92,70
NC	1191,38	97,09	305,38	312,67	2740,04	2784,22	92,70	92,15
PR1	11918,23	97,09	312,67	435,83	2784,22	3226,15	92,15	86,94
PR2	11525,10	105,00	367,44	510,00	3027,91	3423,06	86,94	80,00

Tablica 13 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za preopterećenje od 105 t/h

Površina na strani DP			
	G	$T_{gu}$	$T_{gi}$
	kg/s	°C	°C
LOŽ	31,92	2232,21	1428,40
PZ - prijelazna zona	32,13	1428,40	1369,27
PR2	32,34	1369,27	1034,69
PR1	32,55	1034,69	678,18
EKO2	32,76	678,18	464,93
EKO1/3	32,97	464,93	319,04
EKO1/2	33,18	319,04	251,94
EKO1/1	33,18	251,94	189,01

Tablica 14 Ostali rezultati za preopterećenje od 105 t/h

Ostali rezultati		
Količina vode za hlađenje	7,913042	t/h
Iskoristivost generatora pare	0,920309	
Potrošnja goriva	7361,806	kg/h
Unosena toplota u ložište	89041,67	kW

#### 4.4.5 Proizvodnja pare 50, 60, 70 i 90 t/h

Da se dobije što bolji prikaz ponašanja generatora pare u analizi njegovih rezultata u ovisnosti o opterećenju, moraju se pogledati i ostala opterećenja koja su, u ovom slučaju, linearno raspoređena između opterećenja od 40 i 100 t/h.

Tablica 15 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 50 t/h

Površina na strani vode-pare								
	$Q$ kW	$D$ t/h	$T_{wu}$ °C	$T_{wi}$ °C	$H_{wu}$ kJ/kg	$H_{wi}$ kJ/kg	$P_{wu}$ bar	$P_{wi}$ bar
EKO1/1	542,80	52,86	140,00	148,70	595,69	632,66	99,44	96,83
EKO1/2	720,08	52,86	148,70	160,02	632,66	681,69	96,83	93,72
EKO1/3	1765,87	52,86	160,02	187,63	681,69	801,95	93,72	89,82
EKO2	2239,69	52,86	187,63	221,81	801,95	954,48	89,82	84,56
ISP - lož	21901,43	448,76	293,87	298,77	1312,40	1488,09	84,56	84,56
SP - drugi prolaz DF	2775,53	299,18	293,87	298,77	1312,40	1345,80	84,56	84,56
PZ - prijelazna zona	531,10	299,18	298,77	298,77	1345,80	1352,19	84,56	84,56
NC	220,10	49,86	298,77	301,60	2752,92	2768,81	84,56	84,36
PR1	4529,03	49,86	301,60	385,88	2768,81	3095,80	84,36	82,32
PR2	4640,62	50,00	383,52	510,00	3088,93	3423,06	82,32	80,00

Tablica 16 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 50 t/h

Površina na strani DP			
	$G$ kg/s	$T_{gu}$ °C	$T_{gi}$ °C
LOŽ	15,12	2232,21	1139,93
PZ - prijelazna zona	15,22	1139,93	1094,76
PR2	15,32	1094,76	807,73
PR1	15,42	807,73	514,97
EKO2	15,52	514,97	340,49
EKO1/3	15,62	340,49	234,12
EKO1/2	15,72	234,12	189,79
EKO1/1	15,72	189,79	156,45

Tablica 17 Ostali rezultati za opterećenje 50 t/h

Ostali rezultati		
Količina vode za hlađenje	0,137345	t/h
Iskoristivost generatora pare	0,931977	
Potrošnja goriva	3487,991	kg/h
Unosena toplota u ložište	42187,55	kW

Tablica 18 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 60 t/h

Površina na strani vode-pare								
	$Q$	$D$	$T_{wu}$	$T_{wi}$	$H_{wu}$	$H_{wi}$	$P_{wu}$	$P_{wi}$
	kW	t/h	°C	°C	kJ/kg	kJ/kg	bar	bar
EKO1/1	775,40	61,60	140,00	150,60	595,69	641,01	103,57	100,51
EKO1/2	968,51	61,60	150,60	163,63	641,01	697,61	100,51	96,87
EKO1/3	2306,90	61,60	163,63	194,59	697,61	832,44	96,87	92,25
EKO2	2826,27	61,60	194,59	231,09	832,44	997,62	92,25	86,04
ISP - lož	24592,41	527,37	295,64	300,01	1322,05	1489,93	86,04	86,04
SP - drugi prolaz DF	3563,35	351,58	295,64	300,01	1322,05	1358,54	86,04	86,04
PZ - prijelazna zona	648,39	351,58	300,01	300,01	1358,54	1365,18	86,04	86,04
NC	359,67	58,60	300,01	304,02	2750,66	2772,76	86,04	85,77
PR1	5777,54	58,60	304,02	397,43	2772,76	3127,71	85,77	83,12
PR2	5909,64	60,00	377,30	510,00	3068,48	3423,06	83,12	80,00

Tablica 19 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 60 t/h

Površina na strani DP			
	$G$	$T_{gu}$	$T_{gi}$
	kg/s	°C	°C
LOŽ	18,14	2232,21	1212,55
PZ - prijelazna zona	18,26	1212,55	1163,72
PR2	18,38	1163,72	859,82
PR1	18,50	859,82	549,95
EKO2	18,62	549,95	366,22
EKO1/3	18,74	366,22	250,97
EKO1/2	18,86	250,97	201,60
EKO1/1	18,86	201,60	161,92

Tablica 20 Ostali rezultati za opterećenje 60 t/h

Ostali rezultati		
Količina vode za hlađenje	1,410962	t/h
Iskoristivost generatora pare	0,930039	
Potrošnja goriva	4184,422	kg/h
Unosena toplota u ložište	50610,95	kW

Tablica 21 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 70 t/h

Površina na strani vode-pare								
	$Q$	$D$	$T_{wu}$	$T_{wi}$	$H_{wu}$	$H_{wi}$	$P_{wu}$	$P_{wi}$
	kW	t/h	°C	°C	kJ/kg	kJ/kg	bar	bar
EKO1/1	1043,30	70,22	140,00	152,43	595,69	649,18	106,82	103,49
EKO1/2	1241,45	70,22	152,43	167,08	649,18	712,82	103,49	99,52
EKO1/3	2893,40	70,22	167,08	201,11	712,82	861,16	99,52	94,41
EKO2	3459,75	70,22	201,11	239,79	861,16	1038,53	94,41	87,57
ISP - lož	27036,13	604,99	297,40	301,28	1331,69	1492,57	87,57	87,57
SP - drugi prolaz DF	4385,63	403,33	297,40	301,28	1331,69	1370,83	87,57	87,57
PZ - prijelazna zona	748,85	403,33	301,28	301,28	1370,83	1377,52	87,57	87,57
NC	520,05	67,22	301,28	306,24	2748,32	2776,17	87,57	87,24
PR1	7085,20	67,22	306,24	408,01	2776,17	3155,61	87,24	83,96
PR2	7176,17	70,00	373,28	510,00	3054,00	3423,06	83,96	80,00

Tablica 22 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 70 t/h

Površina na strani DP			
	$G$	$T_{gu}$	$T_{gi}$
	kg/s	°C	°C
LOŽ	21,18	2232,21	1273,12
PZ - prijelazna zona	21,31	1273,12	1222,00
PR2	21,45	1222,00	906,78
PR1	21,59	906,78	582,81
EKO2	21,73	582,81	390,53
EKO1/3	21,87	390,53	267,29
EKO1/2	22,01	267,29	213,13
EKO1/1	22,01	213,13	167,73

Tablica 23 Ostali rezultati za opterećenje 70 t/h

Ostali rezultati		
Količina vode za hlađenje	2,778607	t/h
Iskoristivost generatora pare	0,92806	
Potrošnja goriva	4883,936	kg/h
Unosena toplota u ložište	59071,62	kW

Tablica 24 Izmijenjene topline, protoci i temperature na izmjenjivačima za opterećenje 90 t/h

Površina na strani vode-pare								
	$Q$	$D$	$T_{wu}$	$T_{wi}$	$H_{wu}$	$H_{wi}$	$P_{wu}$	$P_{wi}$
	kW	t/h	°C	°C	kJ/kg	kJ/kg	bar	bar
EKO1/1	1670,48	87,32	140,00	155,92	595,69	664,56	109,27	106,09
EKO1/2	1847,77	87,32	155,92	173,45	664,56	740,74	106,09	102,34
EKO1/3	4198,11	87,32	173,45	212,73	740,74	913,81	102,34	97,25
EKO2	4791,72	87,32	212,73	255,01	913,81	1111,36	97,25	90,61
ISP - lož	31387,61	758,90	300,73	303,78	1349,98	1498,87	90,61	90,61
SP - drugi prolaz DF	6078,52	505,94	300,73	303,78	1349,98	1393,23	90,61	90,61
PZ - prijelazna zona	964,02	505,94	303,78	303,78	1393,23	1400,09	90,61	90,61
NC	885,17	84,32	303,78	310,08	2743,57	2781,36	90,61	90,15
PR1	9810,98	84,32	310,08	425,26	2781,36	3200,22	90,15	85,70
PR2	9678,39	90,00	368,92	510,00	3035,92	3423,06	85,70	80,00

Tablica 25 Temperature i protoci dimnih plinova po zonama za opterećenje 90 t/h

Površina na strani DP			
	$G$	$T_{gu}$	$T_{gi}$
	kg/s	°C	°C
LOŽ	27,29	2232,21	1370,35
PZ - prijelazna zona	27,47	1370,35	1314,16
PR2	27,65	1314,16	985,71
PR1	27,83	985,71	640,49
EKO2	28,01	640,49	435,02
EKO1/3	28,19	435,02	298,17
EKO1/2	28,37	298,17	235,66
EKO1/1	28,37	235,66	179,79

Tablica 26 Ostali rezultati za opterećenje 90 t/h

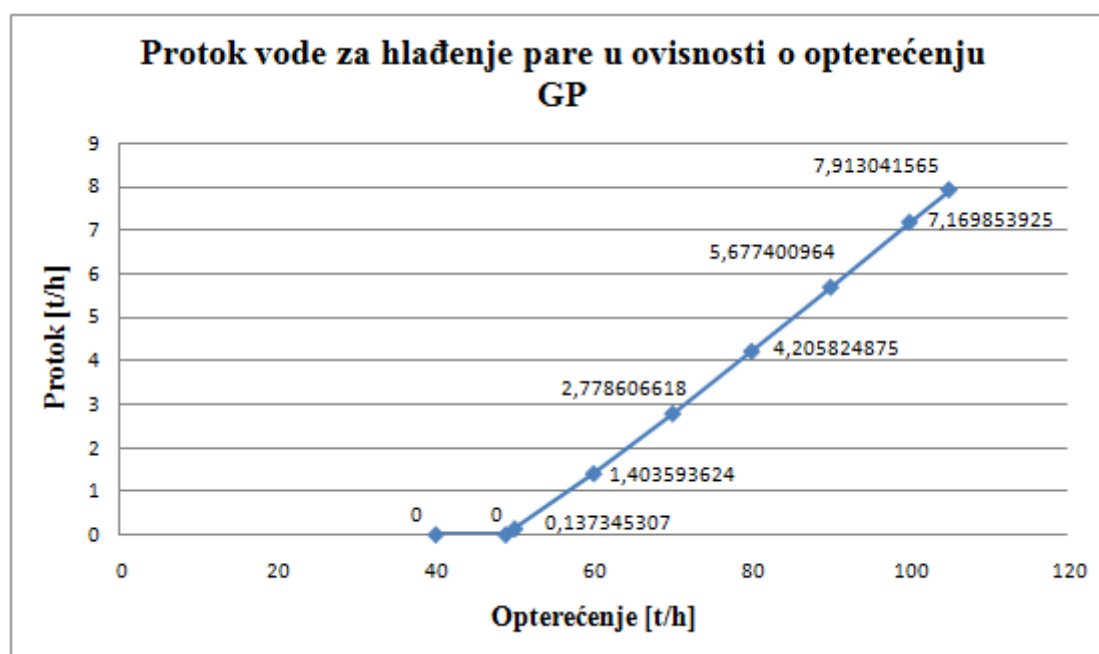
Ostali rezultati		
Količina vode za hlađenje	5,677401	t/h
Iskoristivost generatora pare	0,923631	
Potrošnja goriva	6294,914	kg/h
Unosena toplota u ložište	76137,52	kW

### 4.3 Usporedba rezultata u ovisnosti o opterećenju generatora pare

Nakon provedene simulacije za različita opterećenja generatora pare, uspoređuje se što se događa s bitnim faktorima u modelu u ovisnosti o opterećenju.

Zbog velike količine podataka prikazano je samo par rezultata i njihovih ovisnosti o opterećenju, a do svih ovisnosti se lako dolazi usporedbom podataka prema gore danim tablicama.

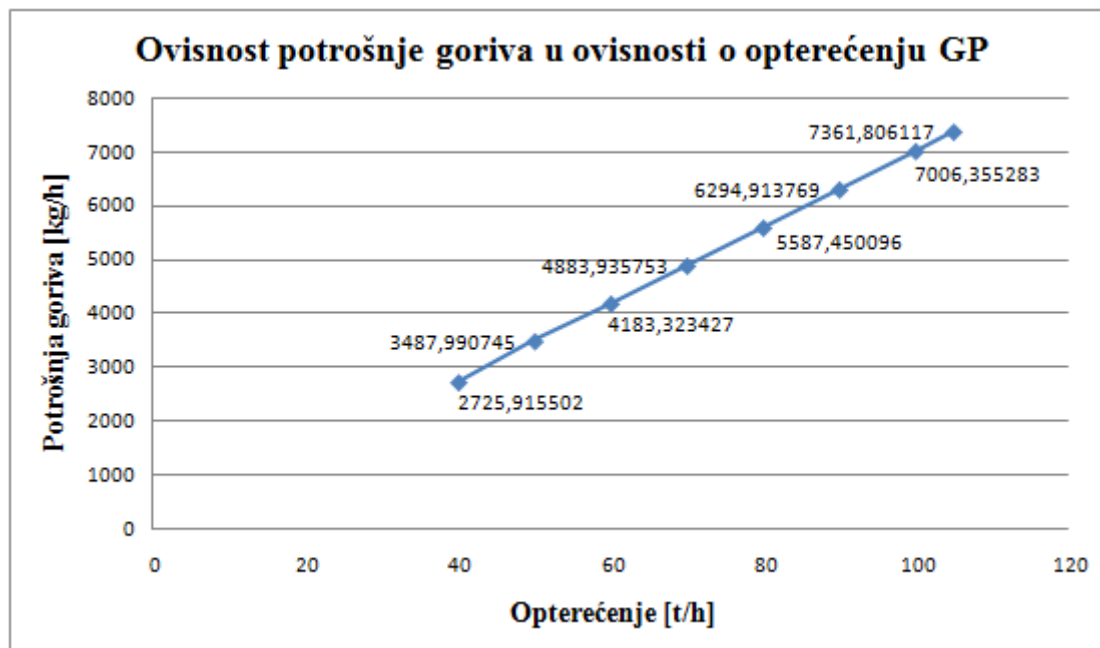
#### 4.3.1 Količina vode za hlađenje pare u ovisnosti o opterećenju generatora pare



Slika 5 Ovisnost protoka vode za hlađenje pare i opterećenja generatora pare

Jasno je vidljivo da porastom opterećenja generatora pare dolazi do veće potrebe za ubrizgavanjem napojne vode koja će svježju paru na izlazu stabilizirati na traženim parametrima, u ovom slučaju na 80 bara i 510 °C. Također, vidi se da pri određenim opterećenjima ubrizgavanje vode nije potrebno, ali pri tim opterećenjima izlazna temperatura pare ne dolazi do zadanih 510 °C.

#### 4.3.2 Potrošnja goriva u ovisnosti o opterećenju generatora pare

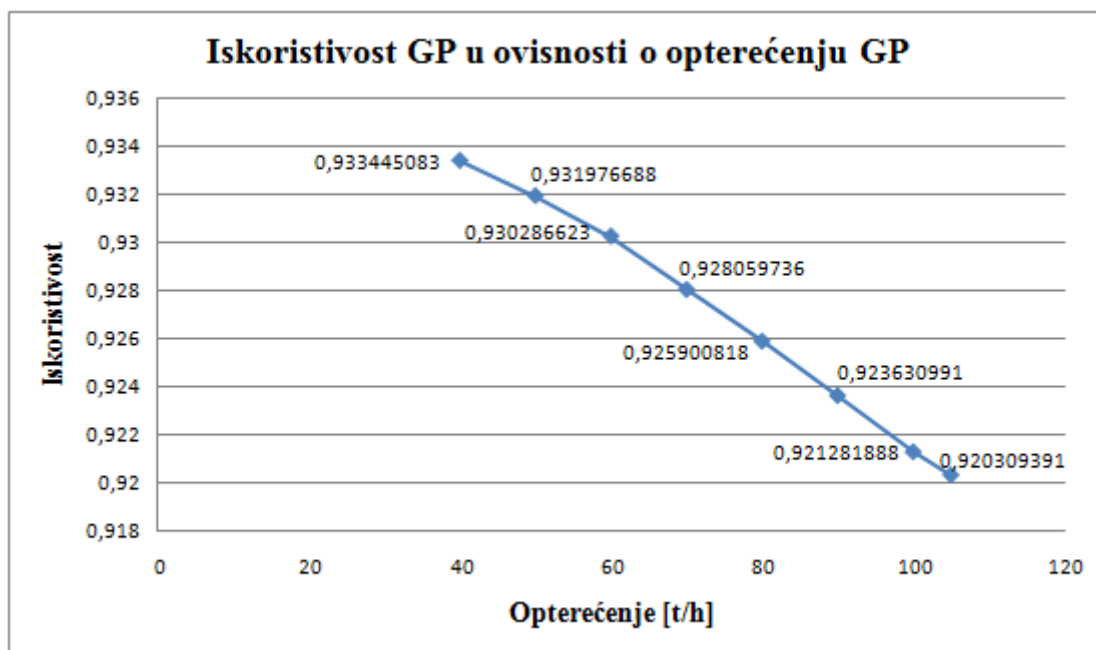


Slika 6 Ovisnost potrošnje goriva o opterećenju generatora pare

Potrošnja goriva direktno je vezana s opterećenjem generatora pare pa zbog toga porast opterećenja mora za posljedicu imati i porast potrošnje goriva.



#### 4.3.3 Ovisnost iskoristivosti generatora pare o opterećenju generatora pare

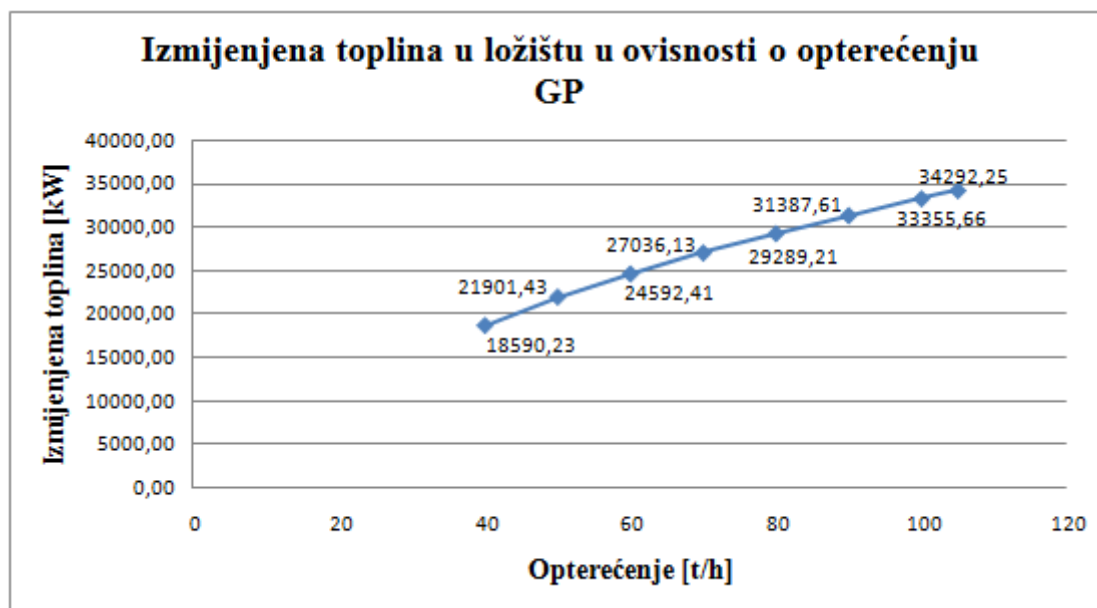


Slika 7 Ovisnost iskoristivosti generatora pare o opterećenju generatora pare

Na iskoristivost generatora pare jako utječe izlazna temperatura dimnih plinova, a jasno je da manje opterećenje donosi i manji protok dimnih plinova.

Manji protok dimnih plinova se lakše hladi kroz generator pare jer su izmjenjivačke površine ostale iste pa je porast iskoristivosti s padom opterećenja očekivan rezultat.

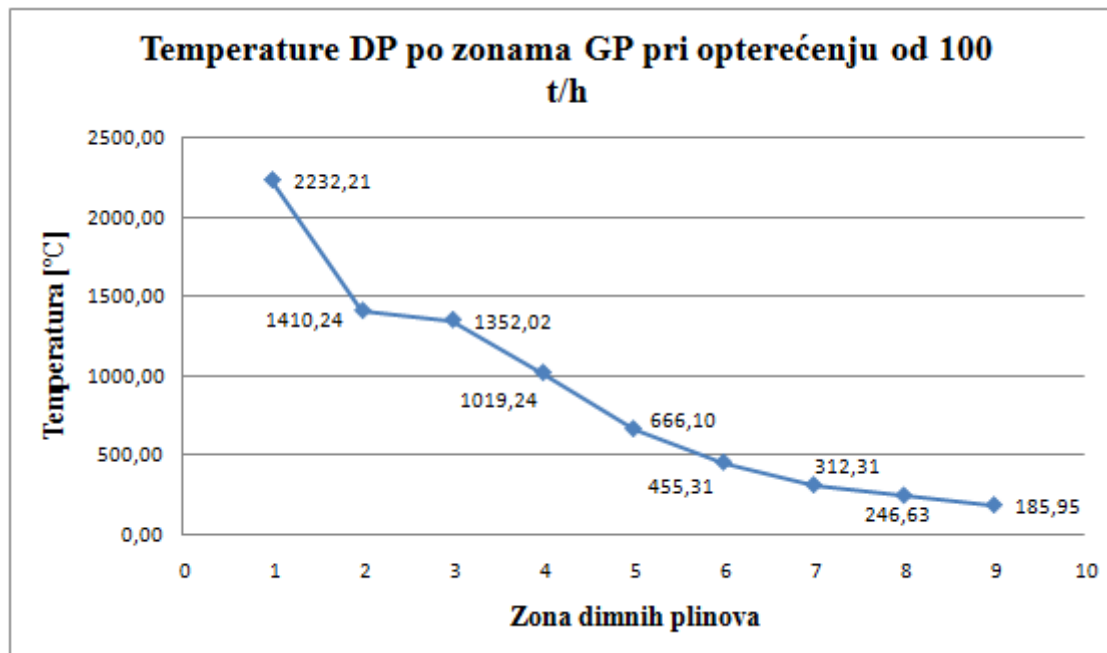
#### 4.3.4 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka u ložištu u ovisnosti o opterećenju generatora pare



Slika 8 Ovisnost izmijenjenog toplinskog toka u ložištu u ovisnosti o opterećenju generatora pare

Izmijenjena toplina u ložištu, kao i potrošnja goriva, očekivano raste s porastom opterećenja generatora pare.

#### 4.3.5 Temperature dimnih plinova po zonama generatora pare pri opterećenju od 100 t/h



Slika 9 Temperature dimnih plinova po zonama generatora pare pri opterećenju od 100 t/h

Podijela na zone, odnosno kontrolne volumene u generatoru pare:

- |       |                         |           |
|-------|-------------------------|-----------|
| 1 – 2 | Ložište (LOŽ)           | - 1. zona |
| 2 – 3 | Prijelazna zona (PZ)    | - 2. zona |
| 3 – 4 | Pregrijač II (Pr2)      | - 3. zona |
| 4 – 5 | Pregrijač I (Pr1)       | - 4. zona |
| 5 – 6 | Ekonomajzer II (EKO2)   | - 5. zona |
| 6 – 7 | Ekonomajzer I-3 (EKO13) | - 6. zona |
| 7 – 8 | Ekonomajzer I-2 (EKO12) | - 7. zona |
| 8 – 9 | Ekonomajzer I-1 (EKO11) | - 8. zona |

## 5. ZAKLJUČAK

Cilj ovog zadatka je bio pokušati što točnije, naravno uz određena pojednostavljena, simulirati putem modela u računalnom programu Microsoft Excel VBA ponašanje generatora pare iz stvarnog postrojenja Ina rafinerije u Sisku.

Ulazni podaci su možda u nekim slučajevima nerealni za sadašnje vrijeme, ali moramo uzeti u obzir da su korišteni podaci iz 1977. i 1981. godine.

Isto tako, postoje neka odstupanja u izlaznim vrijednostima modela u usporedbi s onim koje su dobivene tokom ispitivanja istog, ali zbog pojednostavljena i ostalih pretpostavki koje su dovele do konačnog izgleda modela, možemo smatrati da model daje relevantne i približno točne rezultate.

## **6. PRILOZI**

### **I. CD-R disk**

## 7. LITERATURA

[0] „Matematički model – NPG Rafinerija Sisak“ – model ustupljen od strane mentora

[1] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Generator\\_pare](https://hr.wikipedia.org/wiki/Generator_pare)

[2] [http://www.phb.hr/upload\\_data/site\\_photos/big1\\_22112008-001-.jpg](http://www.phb.hr/upload_data/site_photos/big1_22112008-001-.jpg)

[3] Generatori pare-predavanja (interna skripta, FSB)

[4] [http://marjan.fesb.hr/~bblag/publications/books/Excel\\_VBA\\_manual.pdf](http://marjan.fesb.hr/~bblag/publications/books/Excel_VBA_manual.pdf)

[5] <http://ic.ims.hr/office2007/excel2007/vba-excel/vba-excel-2.html>

[6] Institut za elektroprivredu – Zagreb: GARANCIJSKA ISPITIVANJA KOTLOVA  
WAAGNER BIRO, TIP 70/100-1 TA 95 U ENERGANI KPVI INA- RAFINERIJA SISAK,  
Zagreb, 1981.

[7] INA – RAFINERIJA SISAK: GLAVNI STROJARSKO TEHNOLOŠKI PROJEKT  
INDUSTRIJSKE TE-KP 6, Zagreb, svibanj 1977.